ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202302.00150v1

自走式果园多工位收获装备设计与试验

缪友谊[1]，陈 红[2,3*]，陈小兵[1]，田皓予[2,3]，袁 栋[1]

（1. 农业农村部南京农业机械化研究所，江苏南京 210014；2. 华中农业大学 工学院，湖北武汉 430070；
3. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室，湖北武汉 430070）

摘　要：为解决现代化果园水果收获过程中人工劳动强度大、作业效率低、配套机械匮乏等问题，结合果树矮砧宽行密植模式和农艺种植要求，本研究设计了一种自走式果园多工位收获装备。首先介绍了自走式果园多工位收获装备的整机结构和工作原理，然后根据"两侧、两高度、六工位"采摘作业模式，对履带自走式底盘、扩展作业平台、果实自动输送装箱及转运系统的关键部件进行了参数分析、计算与结构设计。田间试验结果表明，所设计的自走式果园多工位收获装备可同步于六工位人工采收速度，苹果采收损伤率为4.67%，装箱均布系数为1.475，装箱速度为72.9个/min，能够满足果园采收作业要求。

关键词：履带底盘；扩展作业平台；自动输送装箱；装箱均布系数；采收损伤率；转运系统

中图分类号：S225　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**SA202206007

引用格式：缪友谊, 陈红, 陈小兵, 田皓予, 袁栋. 自走式果园多工位收获装备设计与试验[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(3): 42-52.

MIAO Youyi, CHEN Hong, CHEN Xiaobing, TIAN Haoyu, YUAN Dong. Design and test of self-propelled orchard multi-station harvesting equipment[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(3): 42-52. (in Chinese with English abstract)

1 引　言

2020年，中国果园面积已达1264.63万公顷，水果产量达2.87亿吨，面积、产量均位居世界首位，其中苹果、柑橘种植面积在全国水果种植总面积中占比超过30%[1]。苹果、柑橘等果树主要在丘陵山地区域种植，均依靠人工进行采摘作业，采收效率低，劳动强度大。20世纪60年代后期，意大利等欧美国家研制出轮式自走式收获作业平台，可以辅助多工位工人实现不同高度果实的采摘功能，并能完成自动收集和装箱[2,3]，极大地提高了采收效率，降低了劳动强度，在发达国家的果园中得到广泛应用，但因其价格昂贵，不适用中国地形和种植模式，难以在中国推广应用[4-6]。

国内外学者针对果园采收装备开展了一系列研究。Silwal等[7]以机器视觉系统为基础，结合设计的抓取终端执行器，使苹果平均摘取成功率达到84%，显示了机器人采收苹果的巨大潜力，但离大规模推广应用还有很长道路。Fei等[8,9]将传统的收获平台转变为协作机器人（co-robot）平台，利用视觉系统估计进料的水果分布，以及仪表化的拣选袋测量每个工人的拣选速度，进而控制液压升降机的高度，使采摘效率提高了9.5%，但成本较高，不适用于市场推广。Zhang等[10]为了降低苹果在装箱时的损伤率，研制了

收稿日期：2022-06-20
基金项目：国家重点研发计划项目（2017YFD0701400）
作者简介：缪友谊（1989—），男，硕士，助理研究员，研究方向为果园及植保技术与装备。E-mail：youyi917@163.com
*通信作者：陈 红（1968—），女，博士，副教授，研究方向为水果生产机械化技术与装备。E-mail：chenhong@mail.hzau.edu.cn

chinaXiv:202302.00150v1

一种低成本苹果采摘辅助装置，有效降低了苹果损伤率，但未对苹果在果箱内的分布均匀性进行研究。

近年来，众多研究者对小型升降式辅助作业平台进行了设计与研究，解决了水果收获时需要搭设扶梯的问题，但仅能辅助人工分层采摘不同高度的果实，无法实现对采收果实的输送和装箱功能[11-13]。高杨等[14]以小型履带作业平台为基础研发的采摘机器人，通过执行器完成对不同水果的采摘以及储存，但复杂冠层条件下对水果的识别难度较大、整体工作效率较低。杨贞等[15]设计了一种“双侧、三高度、六工位”牵引式采摘平台，实现了苹果从采摘工位到果箱的装箱传送，但牵引式结构导致工作转向半径大，同时需要额外动力牵引。范晓文等[16]设计了一款轮式多工位采摘平台，实现了果实的收集与装箱，但果箱为后置式结构，无法实现果园行间的连续换箱作业。

为解决传统轮式底盘通过性差以及采收作业过程中水果自动装箱效率低、损伤率大的问题，基于自走式履带底盘结构，本研究研发了一种具备扩展作业平台、前后通畅式果箱连续作业装卸系统以及水果自动输送及装箱装置的自走式果园多工位收获装备，能够满足现代化宽行密植种植模式下辅助人工采收作业需求，并实现果实的高效收获以及低损均匀装箱。

2 整机结构和工作原理

2.1 整机结构方案设计

中国的果园大多数位于山地，地形条件复杂。为适应丘陵山地现代化果园种植模式以及复杂地形，确保作业平台能够进入果园行间进行作业，同时避免机具在果树行间周期性作业对土壤反复镇压造成的土壤板结问题，自走式果园多工位收获装备选用履带式底盘结构，在增大与土壤接触面积的同时，增强装备的稳定性[17, 18]。

考虑到果实输送的低损伤率和均布性能，对果实收集和装箱方案进行设计。可供参考的果实收集设备有传送带式、气吸式以及人工放置式三种。传送带式主要依靠传送带将采摘后的果实汇集到装箱系统，工作过程平稳且损伤率低，并且工作的流畅性和持续性较好（图1）；气吸式是利用管道端口的正负压差将果实吸入管道实现输送，但此过程中果实损伤率较高且能耗较大；人工放置式即人工采摘后放置于果箱中，这种方式需要高人工参与度，且效率低下，难以保证低损伤率。综上所述，果实收集时选择传送带式为最佳。

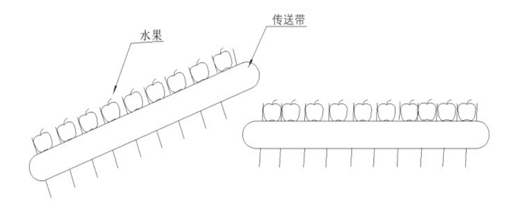


图1　传送带式果实收集方案

Fig.1 Conveyor-based fruit collection solution

果实装箱工艺主要有果箱固定式和果箱旋转式两种，二者主要区别在于输送过程中对果实的均布方式不同。果箱固定式装箱通过固定果箱，旋转果箱上方均布器来控制果实均匀落入箱内，均布器叶片采用软质材料以减少果实损伤；果箱旋转式装箱采用毛刷筒降低果实运输损伤，然后以果箱的旋转进行果实均布。综合考虑认为，果箱旋转的均布方式能耗较大，而且结合本研究机器的履带底盘和载人平台结构，不再适合添加果箱的旋转装置，因此本研究选用果箱固定式装箱工艺（图2）。

考虑到机器行走时，平台上部作业人员灵活度没有地面作业人员高，采收速度较慢，在平台上部两侧各增加一个工位，保证上下层采摘速度一致，提出“两侧、两高度、六工位”的采摘作业模式。设计的整机结构以及果实输送路径如图3和图4所示，主要由履带底盘、载人作业平台、果实自动输送系统、果箱装卸机构及果实装箱系统等组成，可一次性完成果实的收集、装箱、换箱等作业。其中，果实自动输送系统由倾

ChinaXiv合作期刊

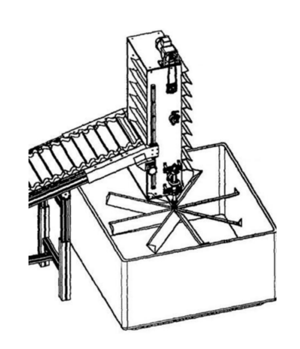
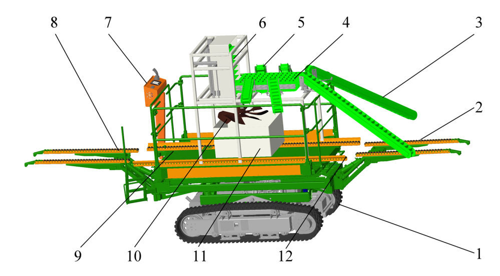


图 2　果箱固定式果实装箱方案

Fig. 2　Fixed fruit box packing solution

斜输送装置、水平输送装置和垂直输送装置组成，用于完成果实的收集；装箱系统由均布装置、垂直升降装置等组成，用于完成果实的智能装箱；果箱装卸系统由果箱前装卸机构、果箱滑轨、果箱后装卸机构组成，用于完成果箱的连续装卸作业。倾斜输送装置包含4条短倾斜输送装置和2条长倾斜输送装置，对应6个采收工位设置在果箱两侧，短倾斜输送装置用于传送作业平台工位采摘的果树中上部果实，长倾斜输送装置用于传送地面工位采摘的果树中下部果实。



注：1. 履带底盘；2. 果箱后装卸机构；3. 长倾斜输送装置；4. 水平输送装置；5. 短倾斜输送装置；6. 垂直输送装置；7. 驾驶台；8. 果箱前装卸机构；9. 载人作业平台；10. 均布装置；11. 果箱；12. 果箱滑轨

图 3　自走式果园多工位收获装备结构示意图

Fig. 3　Structure diagram of self-propelled orchard multi-station harvesting equipment

自走式果园多工位收获装备参数如表1所示。

2.2　工作原理

自走式果园多工位收获装备由柴油机提供动力驱动履带底盘行走，同时柴油机配有发电机为

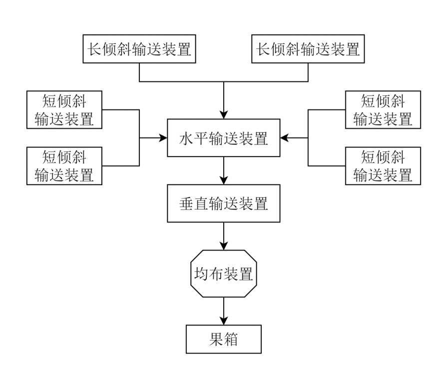


图 4　果实收集、输送和装箱路径

Fig. 4　Fruit collection, transportation and packing path

表 1　自走式果园多工位收获装备主要参数

Table 1　Main parameters of self-propelled orchard multi-station harvesting equipment

参数	设计值
整机尺寸(长×宽×高)/mm	4890×2200×3700
载人作业平台尺寸/mm	3000×(1500～2700)
载人作业平台离地高度/mm	1300
工作速度/(km·h^{-1})	0～2
果箱尺寸/mm	850×850×850
配套动力功率/kW	32.3
收获装置功率/kW	1.36
额定载荷/kg	1000
采收滞后率/%	0
采收损伤率/%	<10

载人作业平台上部果实输送与装箱系统提供电力。作业时需配备专职驾驶员1名，采摘作业人员6名。驾驶员负责驾驶以及控制载人作业平台，6名采摘作业人员对应6条倾斜输送装置工位，各倾斜输送装置可水平和俯仰转动至需要的位置，方便工人放置果实。

水果采收作业时，首先由驾驶员将果箱前装卸机构降至与地面接触，将空果箱推至果箱前装卸机构的轨道后，由液压驱动提升果箱前装卸机构至与果箱滑轨对齐，随后将空果箱推至作业平台待装箱工位，并对空果箱进行限位固定。

驾驶员驾驶机器以工作速度前进，6名采摘作业人员负责各自区域对应高度的水果采摘作业，被采摘下的果实由对应倾斜输装置汇集至水平输送装置，再汇集至垂直输送装置上，最后通过均布装置均匀地落入果箱中。每铺满一层果

chinaXiv:202302.00150v1

chinaXiv:202302.00150v1

实，均布装置和垂直输送装置上升一定高度，保证均布器叶片与果面保持适当距离以降低碰撞损伤，果实逐层装满。当升降装置上升至与限位开关触碰后，提示果箱已装满，停止水果装箱工作。

装箱完毕后，采摘作业人员示意驾驶员停止行驶，由驾驶员将果箱后装卸机构提升至与果箱滑轨对齐；采摘作业人员解除满果箱限位，并通过果箱滑轨将满果箱推至果箱后装卸机构；驾驶员控制果箱后装卸机构降至地面，当与地面接触后解除果箱限位，满载的果箱自动滑至地面，由后续车辆转运至仓库。随后驾驶员通过果箱前装卸机构从装备前部重新装载并提升另一空果箱至装箱工位，采摘作业人员对空果箱限位后继续作业。

3 关键部件设计及计算

3.1 履带底盘设计

履带底盘系统设计中，接地比压与机器质量、履带接地长度、轨距和履带宽度密切相关，合理的接地比压可以提高机械的通过性能和转向性能，通常设计平均接地比压值$p \leqslant 0.05$ MPa [19,20]。宽行密植果园果树行间距通常为3～5 m，部分果园果树为起垄栽培模式，设计时应确保履带底盘与果树根部及垄壁保持一定距离，而底盘越宽则整机稳定性越高，结合调研情况确定底盘的最大设计宽度不超过1800 mm。与轮式底盘结构相比，履带底盘自重大，其整机质量达到3000 kg，作业平台主要载荷为7名人员及满箱水果共计1400 kg，底盘参数计算时考虑载荷安全余量，取承载总质量为4600 kg。水果采收作业时速度较慢，通常为1～2 km/h，选取最大行走速度2 km/h作为设计参数，履带各参数计算如公式（1）～（3）所示。

$$b = (0.9 \sim 1.1) \times 209 \times \sqrt[3]{m \times 10^{-3}} \tag{1}$$

$$L = (1.2 \sim 1.4) \times B \tag{2}$$

$$p = \frac{9.8G}{2bL} \tag{3}$$

其中，b为履带宽度，mm；m为承载总质量，kg；L为履带接地长度，mm；B为轨距，mm；p为接地比压，MPa。据此计算取整后得履带宽度b为350 mm，轨距B为1450 mm，接地长度L为2028 mm，校核平均接地比压p为0.037 MPa，符合设计要求。

底盘行走时，驱动力必须大于或等于各摩擦阻力之和，但也要小于或等于地面对履带的附着力。两侧履带由于速度差异导致状态各不相同，从而导致出现滚动阻力及转动阻力，其中两侧履带无速度差时，底盘系统阻力最小，为两侧履带的滚动阻力；当两侧履带出现速度差时，由于运动不同步导致履带接地面发生位移而形成的转动阻力远大于滚动阻力，必须考虑各种复杂工况下的动力需求，动力选型参数计算如公式（4）～（6）所示。

$$F_1 = mgf \tag{4}$$

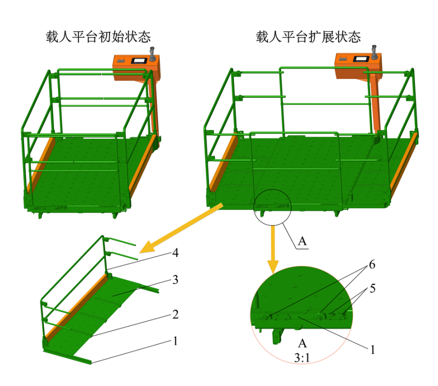
$$P_1 = F_{max}v = mgf_{max}v \tag{5}$$

$$P_2 = \frac{P_1}{\eta_1\eta_2} \tag{6}$$

其中，F_1为行走阻力，N；g为重力加速度，取9.8 m/s^2；f为滚动阻力系数；P_1为马达最大功率，kW；f_{max}为最大等效工况滚动阻力系数，取0.69；v为最大车速，m/s；P_2为发动机所需功率，kW；η_1为马达机械效率，取0.9；η_2为泵容积效率，取0.85。经计算得到马达最大功率为17.2 kW，发动机所需最大功率为22.6 kW。考虑到平台其余油缸动作以及发电机消耗功率，选用额定功率为32.3 kW，额定转速为2600 r/min的洋马4TNV88型发动机可满足参数要求。

3.2 扩展工作平台设计

现代果园果树行距为3～5 m，载人平台初始设计宽度为1500 mm，初始宽度无法适应不同行距果园采收需求，在主作业平台基础上扩展作业平台宽度十分必要。本研究设计的扩展工作平台如图5所示，由C型钢、导向槽、平台钢板、护栏、导向轴承、支撑轴承以及液压油缸等组成，单侧扩展作业平台宽度为600 mm，两侧扩展作业平台可无级扩展，载人作业展开后宽度可达2700 mm。



注：1. C型钢；2. 导向槽；3. 平台钢板；4. 护栏；5. 导向轴承；6. 支撑轴承

图5 载人作业扩展工作平台结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of expansion work platform for carrier operation

扩展作业平台前后两侧C型钢与主作业平台底部滑槽中的支撑轴承滑动连接，C型钢侧面通过导向轴承限位，选用的C型钢截面尺寸为85 mm×48 mm×6 mm，主作业平台通过液压油缸与扩展作业平台底部铰接并带动扩展作业平台实现伸缩动作，推力F_t及液压油缸参数计算如公式（7）所示。

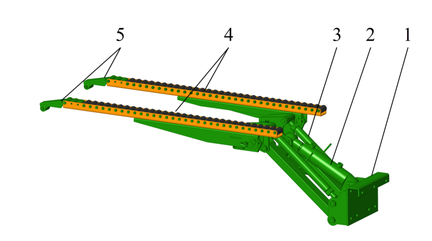
$$F_t = \mu\left(m_c + m_z\right)g = \frac{\pi}{4}P\left(d_1^{\,2} - d_2^{\,2}\right) \qquad (7)$$

其中，μ为扩展作业平台与主作业平台之间的摩擦系数，取0.4；m_c为扩展作业平台承载重量，kg；m_z为扩展作业平台自重，kg；P为液压系统工作压力，MPa；d_1为油缸活塞直径，mm；d_2为油缸推杆直径，mm。油缸设计压力为25 MPa，计算确定油缸活塞直径d_1为40 mm，油缸推杆直径d_2为25 mm。

3.3 果箱装卸机构设计

果箱装卸机构主要由机架、液压油缸、连杆机构、滑轨和限位块等组成，根据安装位置分为前装载机构和后装载机构，其主要功能为从地面装载空果箱提升至作业平台以及卸载装满果实的果箱至地面。如图6所示，作业时果箱装卸机构通过液压油缸带动连杆机构实现上下运动，限位块设计在滑轨末端，自由状态下限位块凸起，防止果箱滑出，当限位块与地面接触后，凸起自动解除，果箱沿滑轨依靠自身重力滑落至地面。

果箱装卸机构上的导轨可通过液压油缸提升至与作业平台上的双果箱滑轨对齐，形成前后通畅式果箱移动通道。



注：1. 机架；2. 液压油缸；3. 连杆机构；4. 滑轨；5. 限位块

图6 果箱装卸机构结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of fruit box loading and unloading mechanism

果箱装卸机构中油缸受力随油缸与机架之间的夹角变化而变化，对装载机构简化后受力分析如图7所示。

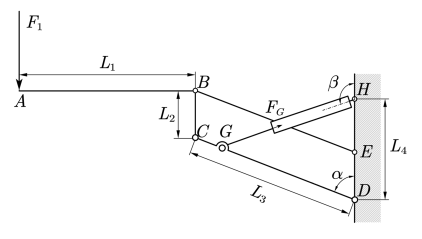


图7 果箱装卸机构受力分析图

Fig. 7 Force analysis diagram of fruit box loading and unloading mechanism

建立力矩平衡方程（8）可得：

$$\begin{cases} \sum M_C = 0,\ F_1L_1 - F_{BE}L_2\sin\alpha = 0 \\ \sum F_{Cx} = 0,\ F_{CDx} - F_{BE}\sin\alpha = 0 \\ \sum F_{Cy} = 0,\ F_1 + F_{BE}\cos\alpha - F_{CDy} = 0 \\ \sum M_D = 0,\ F_GL_4\sin\beta - F_{CDx}L_3\cos\alpha \\ \qquad -F_{CDy}L_3\sin\alpha = 0 \end{cases} \qquad (8)$$

其中，F_1为果箱装卸机构载荷，N；L_1为滑轨长度，m；L_2为连杆机构短边长度，m；L_3为连杆机构长边长度，m；L_4为油缸铰接点至连杆机构底部长度，m；F_G为油缸拉力，N；α为连杆机构与机架夹角，(°)；β为油缸与机架夹角，(°)。

油缸的拉力F_G计算方法为公式（9）。

chinaXiv:202302.00150v1

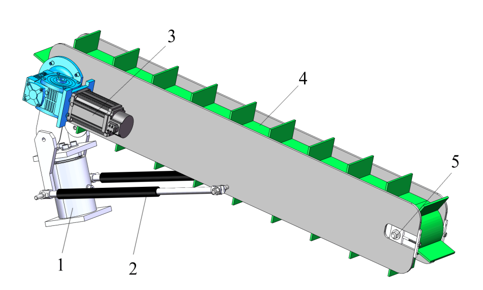
ChinaXiv合作期刊

$$F_G = \frac{F_1 L_3 \sin \alpha}{L_4 \sin \beta} \tag{9}$$

果箱装卸机构在举升的起始阶段时油缸所受拉力最大，计算得到最大拉力为20.26 kN，据此计算选用活塞直径为80 mm，油缸推杆直径为45 mm，油缸行程为400 mm的双作用油缸。

3.4 果实倾斜输送装置设计

如图8所示，倾斜输送装置主要由输送带、直流电机、水平转动装置、气弹簧等组成。输送带上布置适当间距和高度的挡板，达到果实分离和输送的目的，保证果实不发生大范围滚动甚至掉落。由两根布置在倾斜输送装置两侧的气弹簧实现俯仰运动，通过水平转动装置实现倾斜输送装置的水平摆动，采摘人员推动倾斜输送装置就能够随时调整其至所需要的位置，最大限度提高采摘效率和舒适度。



注：1. 水平转动装置；2. 气弹簧；3. 直流电机；4. 输送带；5. 调整螺栓

图8　果实倾斜输送装置

Fig. 8 Tilt-conveying device of fruits

倾斜输送装置由气弹簧支撑，实现俯仰运动的气弹簧不仅要满足倾斜输送装置的上下转动，而且要能够随时停在预定的位置，其受力分析如图9所示。

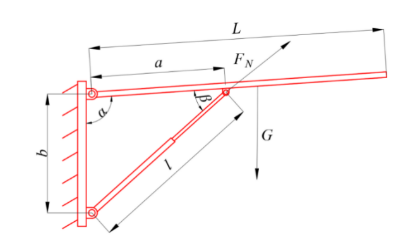


图9　倾斜输送装置气弹簧受力分析图

Fig. 9 Force analysis diagram of tilt-conveying device gas spring

建立力矩平衡方程如公式（10）。

$$\begin{cases} 2F_{N1}\cos(\pi - \alpha_1 - \beta_1)a\sin(\pi - \alpha_1) \\ \qquad -G\dfrac{L}{2}\sin(\pi - \alpha_1) = 0 \\ 2F_{N2}a\cos\left(\dfrac{\pi}{2} - \beta_2\right) - G\dfrac{L}{2}\cos\alpha_2 = 0 \\ \alpha_x = \arccos\dfrac{a^2 + b^2 - l_x^2}{2ab} \\ \beta_x = \arccos\dfrac{a^2 + l_x^2 - b^2}{2al_x} \end{cases} \tag{10}$$

其中，F_N为气弹簧支持力（F_{N1}为低位时气弹簧支持力；F_{N2}为高位时气弹簧支持力），N；G为输送带总重，N；a为气弹簧支点到固定端长度，m；b为固定支座高度，m；l_x为气弹簧长度（l_l为气弹簧原始长度，l_2为气弹簧极限长度），m。

当G=200 N、a=0.45 m、b=0.2 m、L=0.81 m，分析可得气弹簧在最低点l_l=0.31 m时受力最小，在最高点l_2=0.55 m时受力最大。代入公式（10）可得，F_{N1}=140.2 N，F_{N2}=195.3 N，气弹簧受力范围为140.2～195.3 N，在气弹簧自锁范围200 N之内，倾斜输送装置可以实现“随调随定”。

如图10所示，果实倾斜输送装置中，水平转动装置由转动底座与固定底座构成。固定底座固定在机架上，转动底座通过两个深沟球轴承采用过盈配合与固定底座连接，可以实现底座的旋转。转动底座中间凹槽安装有定向圈，通过调节万向球轴承的螺栓可以控制定向圈和滚珠之间的摩擦力，从而达到定向的目的，实现倾斜输送装置水平方向的随调随定。

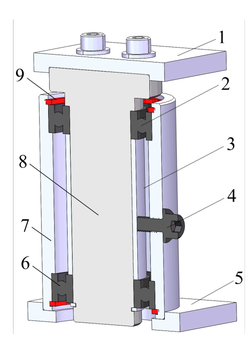
3.5 水平及垂直输送装置设计

水平输送装置如图11所示，其主要作用是将6个倾斜输送装置输送过来的果实汇集并传输至垂直输送装置，由于需要汇集6条倾斜输送装置的果实，所以水平输送带需要有一定的长度和宽度。水平输送装置通过螺栓固定在龙门机架上端，左右两侧与倾斜输送装置相连接。

水平输送带采用的材料是聚氯乙烯。宽度设

chinaXiv:202302.00150v1

ChinaXiv合作期刊



注:1. 盖板;2. 深沟球轴承;3. 轴套;4. 紧定螺钉;5. 底盘;6. 深沟球轴承;7. 外筒;8. 转轴;9. 卡簧

图 10 倾斜输送装置的旋转底座结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the rotating base structure of tilt-conveying device

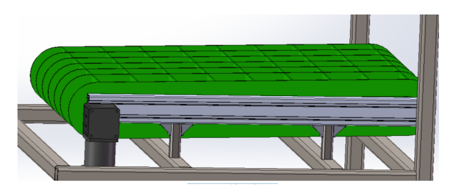
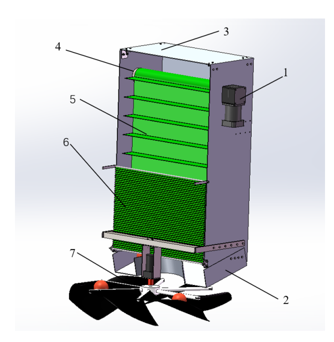


图 11 果实水平输送装置

Fig. 11 Fruit horizontal conveying device

定为590 mm，两端滚筒中心距为980 mm，滚筒外径为80 mm，挡板高度为50 mm，挡板前后、左右间距为100 mm。水平输送带的输送速度与垂直输送装置以及均布装置的速度之间具有相互关系，均布装置的转速确定为40 r/min，均布装置每转一圈可以承载垂直输送带三个挡板的果实，垂直输送装置与水平输送装置的速度保持一致，速度均为0.2 m/s。

垂直输送装置主要是将水平输送装置汇集的果实输送到均布装置上，如图12所示，垂直输送装置主要由减速步进电机、外罩、垂直输送带、滚筒、伸缩板、进料滑道组成，其中由垂直输送带、伸缩板和外罩组成一个密闭的空间，防止果实在输送过程中掉落。垂直输送带的宽度定为590 mm，两端滚筒中心距为840 mm，滚筒外径为80 mm，挡板高度80 mm，挡板间隔为100 mm。进料滑道的主要作用是将果实分成两侧进料，可以有效地提高装箱的均匀性，同时还可以在一定程度上减少果实损伤。



注:1. 步进电机;2. 进料滑道;3. 外罩;4. 滚筒;5. 输送带;6. 伸缩板;7. 均布装置

图 12 果实垂直输送装置

Fig. 12 Vertical conveying device of fruit

3.6 果实均布装置及果面检测系统设计

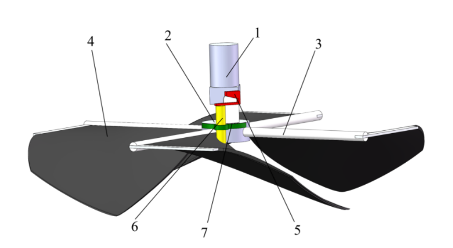
均布装置用来保证从下料斗落出的果实均匀地落入果箱，并实现果实的逐层装箱，降低果实与果箱、果实与果实间碰撞产生的损伤。

如图13所示，均布装置主要由电机、轮辐盘、轮辐支撑条、均布叶片、接近开关、橡胶棒、固定圆环等组成。采取上端电机驱动的方式，用联轴器将电机与轮辐盘相连接，沿轮辐盘轴线安装带有均布叶片的轮辐，均布叶片通过轮辐支撑条和轮辐共同固定。均布装置轮辐长为350 mm，轮辐支撑条长为200 mm，宽为20 mm，轮辐盘为4孔，直径为50 mm，均布叶片数为4个，叶片长为400 mm，均布叶片的材料为厚度3 mm的泡棉，具有质地柔软、表面光滑、柔性好的特点。叶片呈内凹喇叭形安装，两两叶片之间的距离大于苹果直径，在避免果实产生碰撞损伤的同时，有利于果实滑滚。工作时，电机带动均布叶片匀速转动，苹果从出料口经叶片内凹滚道滑落至果箱。均布叶片不断旋转，叶片下端在果面上扫过，将产生堆积的苹果扫开、铺平。

果面检测系统由接近开关、橡胶棒、固定圆环组成，随均布装置转动而转动，用于检测果面是否达到升降标准。固定圆环固定在轮辐支撑条上，橡胶棒套设在均布叶片内侧上，并从固定圆环中穿过，以保证当果面高度上升从而使均布叶片逐渐向上抬起的同时推动橡胶棒沿竖直方向运动，触碰到接近开关，实现信号的传递。

chinaXiv:202302.00150v1

ChinaXiv合作期刊

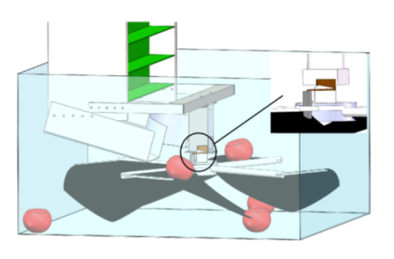


注：1. 电机；2. 轮辐盘；3. 轮辐支撑条；4. 均布叶片；5. 接近开关；6. 橡胶棒；7. 固定圆环

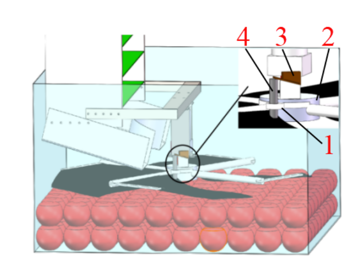
图 13 果实均布装置结构示意图

Fig. 13 Schematic diagram of fruit uniform distribution device structure

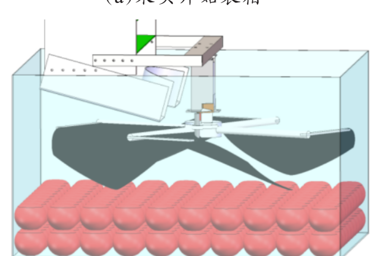
果面检测系统工作时如图14（a）所示，果实通过下料斗落入到均布装置上，并随均布叶片旋转落入果箱内，均布叶片下面的果实与均布叶片接触并使均布叶片向上抬起，当果箱内果实没达到特定高度时，均布叶片上升的高度不足以使橡胶棒触动接近开关，果实继续装箱；如图14（b）和14（c）所示，当箱内果实装到特定高度时，果箱内果实高度足以使均布叶片上的橡胶棒触动接近开关，接近开关检测到信号并控制垂直升降装置带动均布装置上升预定高度，留出装果空间；如图14（d）所示，当完成果面升降检测后，果实继续装箱，直至果实装满果箱。



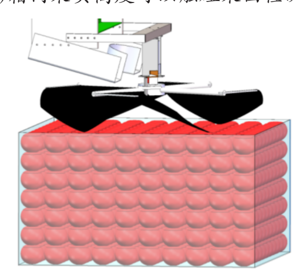
（a）果实开始装箱



（b）箱内果实高度可以触碰果面检测机构



（c）升降装置上升



（d）果实满箱

注：1. 固定圆环；2. 轮辐盘；3. 接近开关；4. 橡胶棒

图 14 果实装箱智能检测流程图

Fig. 14 Flow chart of intelligent detection of fruit packing

4 田间作业性能试验

为验证本研究设计的自走式果园多工位收获装备田间作业性能，于2020年10月在山东省某地开展了苹果收获田间试验。苹果品种为烟台富士，果树单行长度为50 m，平均高度为3.55 m，行距为3.8 m，平均株距为1.0 m。试验现场如图15所示，试验前驾驶员根据果树行距，将两侧左、右扩展作业平台各展开20 cm。为保证苹果采净率，机具采用慢速档行走，作业速度为1 km/h，六个工人分别站在六个倾斜输送装置工位处，旋转调整倾斜输送装置来适应采摘需求。



图 15 自走式果园多工位收获装备苹果采收现场试验

Fig.15 Field experiment of apple harvesting with self-propelled orchard multi-station harvesting equipment

chinaXiv:202302.00150v1

ChinaXiv合作期刊

4.1 试验指标和方法

本研究提出均布系数法评价果实装箱的均匀性。将果箱按每行每列每层划分为5×5×1个单元网格，分别计算每个网格所含果实数目，按公式（11）和公式（12）计算均布系数，以均布系数作为苹果装箱均匀性的指标，均布系数越小，则代表各层之间以及每层中各网格之间苹果数目相差较小，均布效果好。

$$S_n = \frac{|a_1 - b_n| + |a_2 - b_n| + |a_3 - b_n| + |a_4 - b_n| + |a_5 - b_n|}{5} \quad (11)$$

$$S = \frac{S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5}{5} \quad (12)$$

其中，S_n为各层每一行5个单元格的果实装箱均布系数；n为从前到后的行数，n=1～5；a_1、a_2、a_3、a_4、a_5为每一行从左到右每一个单元格中的果实数；b_n为各层每一行五个单元格苹果数的均值；S为果实装箱均布系数。

苹果在从倾斜输送装置至果箱装箱过程中，不可避免的会发生挤压和碰撞等不同类型的机械损伤，而碰撞是苹果收获过程中产生机械损伤的主要原因之一。公式（13）用于计算果实装箱损伤率。

$$S_{损伤率} = \frac{S_{损}}{S_{总}} \times 100\% \quad (13)$$

其中，$S_{损伤率}$为果实的损伤率，%；$S_{损}$为果箱内果实发生表皮、果肉破损的个数，个；$S_{总}$为果箱里面果实的总个数，个。

装箱速度以装满一箱的果实个数除以装满一箱果实所需的时间来计算，如公式（14）所示。

$$V = \frac{n}{T} \quad (14)$$

其中，V为装箱速度，个/min；n为装满箱子时的果实个数，个；T为装满箱子所用的时间，min。

根据响应面参数优化得到果实装箱低损最佳性能参数组合为：均布装置转速29.169 r/min，均布装置高度200 mm。以此参数进行3次果实采收装箱试验，工人们采摘果实后放置到倾斜输送装置，然后汇集至水平输送装置及垂直输送装置，最终通过均布装置落入果箱内。随着果实不断落入果箱内部，箱内果实积累到一定高度时，升降装置触碰到上限位开关，工作停止，一次试验结束，进行果箱置换，重复上述过程，继续下一次试验。每次试验后分别按照公式（11）～（14）来计算均布系数、果实损伤率和装箱速度，取三次结果的平均值作为试验指标最终测试结果。

4.2 试验结果

表2为苹果采收装箱试验结果，结果表明，自走式果园多工位收获装备在采收过程中，各环节工作部件作业稳定，扩展作业平台展开后，能够满足工人手臂对冠层内部苹果采摘需求。果实自动输送装箱系统中，各输送带均能适应工人采摘苹果速度，未发生苹果拥堵现象，采收苹果的损伤率均值为4.67%，果实装箱的均布系数均值为1.475，收集装箱速度均值为72.9 个/min，满足设计要求。

表2 苹果采收装箱试验结果

Table 2 Test results of fruit harvesting and crating

试验序号	采收苹果数量/个	损伤苹果数量/个	损伤率/%	均布系数	装箱速度/（个·min^{-1}）
1	915	49	5.36	1.504	76.7
2	789	30	3.80	1.488	72.6
3	754	32	4.24	1.432	69.4
均值	819.3	37	4.67	1.475	72.9

5 结　论

针对现代化果园生产作业中遇到的用工量大、水果采收效率低的问题，结合果树矮砧宽行密植模式和农艺要求，本研究设计了一种自走式果园多工位收获装备，通过多级输送装置将人工采摘后的果实自动收集并装箱。同时设计了田间果实收获试验，提出均布系数法衡量果实装箱的均布效果，并结合果实损伤情况以及装箱速度综合评价该装备的收获性能，试验结果表明均布系数、损伤率等指标均满足设计要求。该装备可用于实际的果园采摘工作中，主要结论如下：

chinaXiv:202302.00150v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202302.00150v1

（1）根据果树冠层特点，结合“两侧、两高度、六工位”采摘模式，设计了基于履带式底盘的可扩展式工作平台，并对果箱装卸结构、果实倾斜输送装置、果实水平及垂直输送装置、果实均布及果面检测系统等关键零部件进行了结构设计。

（2）田间试验表明，自走式果园多工位收获装备各环节工作部件作业稳定，果实自动收集与装箱速度可同步于六工位人工采收速度，苹果采收损伤率为4.67%，装箱均布系数为1.475，装箱速度为72.9 个/min。

本研究设计的自走式果园多工位收获装备可对人工采收的水果进行收集和装箱，有效降低工人劳动强度，提高生产效率。

参考文献：

[1] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.

[2] MARCOS D, AUGUSTO C, OSCAR A, et al. Harvesting fruit using a mobile platform: A case study applied to citrus[J]. Engenharia Agrícola, 2018, 38(2): 293-299.

[3] ORNWIPA T, KIT G, MARIA T, et al. A feasibility study comparing objective and subjective field-based physical exposure measurements during apple harvesting with ladders and mobile platforms[J]. Journal of Agromedicine, 2019, 24(3): 268-278.

[4] 郑永军, 江世界, 陈炳太, 等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 1-20.
ZHENG Y, JIANG S, CHEN B, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard [J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(11): 1-20.

[5] 赵映, 肖宏儒, 梅松, 等. 我国果园机械化生产现状与发展策略[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(6): 116-127.
ZHAO Y, XIAO H, MEI S, et al. Current status and development strategies of orchard mechanization production in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(6): 116-127.

[6] 缪友谊, 陈小兵, 朱继平, 等. 果园作业平台研究进展分析[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(6): 41-49.
MIAO Y, CHEN X, ZHU J, et al. Research progress of orchard work platform[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(6): 41-49.

[7] SILWAL A, DAVIDSON J, KARKEE M, et al. Effort towards robotic apple harvesting in Washington State[C]// 2016 ASABE International Meeting. St. Joseph, Michigan, USA: the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2016.

[8] FEI Z, SHEPARD J, VOUGIOUKAS S. Estimation of worker fruit-picking rates with an instrumented picking bag[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(6): 1913-1924.

[9] FEI Z, VOUGIOUKAS S. Co-robotic harvest-aid platforms: Real-time control of picker lift heights to maximize harvesting efficiency[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 180: ID 105894.

[10] ZHANG Z, HEINEMANN P, LIU J, et al. Brush mechanism for distributing apples in a low-cost apple harvest-assist unit[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2017, 33(2): 195-201.

[11] 刘丽星, 刘洪杰, 裴晓康, 等. 小型果园电动作业平台的设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(7): 90-94.
LIU L, LIU H, PEI X, et al. Design and test of electric operation platform for small orchard[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(7): 90-94.

[12] 席远军, 高旭宏, 刘洪峰, 等. 履带自走式水果采摘作业平台的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(11): 17-23.
XI Y, GAO X, LIU H, et al. Design and test of the self-propelled crawler work platform for fruit picking[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(11): 17-23.

[13] LONG H, HAN F, MANOJ K, et al. Effect of fruit location on apple detachment with mechanical shaking[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(16): 293-298.

[14] 高杨, 刘继展, 周尧. 小型升降式采摘机器人设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(11): 132-137.
GAO Y, LIU J, ZHOU Y. Design and test of small lifting picking robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(11): 132-137.

[15] 杨贞, 王亚龙, 韩冰, 等. 牵引式果园采摘作业平台果实输送系统的研究设计[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(7): 24-28.
YANG Z, WANG Y, HAN B, et al. Research and design on conveying system for tractive orchard picking platform[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(7): 24-28.

[16] 范晓文, 李雪军, 王鹏飞, 等. 果园多工位作业平台低损输送系统设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(6): 69-73.
FAN X, LI X, WANG P, et al. Design and test of low damage conveyor system for orchard multi-station operation platform[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(6): 69-73.

[17] 王学良, 李强, 范国强, 等. 果园履带式多功能作业机的研制[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 105-108, 119.
WANG X, LI Q, FAN G, et al. Development of orchard crawler multifunctional working machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5): 105-108, 119.

[18] 刘佛良, 张震邦, 杨晓彬, 等. 山地果园双履带微型运输车的设计、仿真与试验[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(4): 15-23.

ChinaXiv合作期刊

LIU F, ZHANG Z, YANG X, et al. Design, simulation and experimental analysis of a miniature double crawler transport vehicle in mountain orchard[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(4): 15-23.

[19] 焦宏章. 履带式车辆转向阻力矩分析[J]. 太原科技大学学报, 2020, 41(1): 37-40.
JIAO H. Analysis on steering resistance moment of caterpillar vehicles[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2020, 41(1): 37-40.

[20] 印祥, 禹泽栋, 俞康, 等. 农业通用履带底盘控制系统研制[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(12): 73-77.
YING X, YU Z, YU K, et al. Development of a control system for a general-purpose crawler-type chassis in agriculture[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(12): 73-77.

Design and Test of Self-Propelled Orchard Multi-Station Harvesting Equipment

MIAO Youyi[1], CHEN Hong[2,3*], CHEN Xiaobing[1], TIAN Haoyu[2,3], YUAN Dong[1]

(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*; 2. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*; 3. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*)

chinaXiv:202302.00150v1

Abstract: In order to solve the problems of high labor intensity, low efficiency of manual operation and lack of supporting machinery in the fruit harvesting of modern orchards, a self-propelled orchard multi-station harvesting equipment was designed in combination with the fruit tree dwarf anvil wide-row dense planting mode and agronomic planting requirements. The whole machine structure and working principle of the self-propelled orchard multi-station harvesting equipment were expounded. According to the environmental conditions of mountainous orchards, the crawler chassis structure was designed, and the working speed was 0~2 km/h. The operating platform including left extension platform and right extension platform was designed according to the difference of fruit tree row spacing, and the working width of the operating platform was 1500~2700 mm. In order to improve the working efficiency and ensure the same picking speed of upper and lower operators, the picking operation mode of "two sides, two heights and six stations" was proposed by comparing the difference in the working flexibility between the operator on the platform and the operator on the ground during the operation of the machine, and the in-and-out channels of fruit boxes and the automatic collection and packing device were designed. The front and rear unobstructed fruit box access system was composed of the front loading and unloading mechanism, the rear loading and unloading mechanism and the fruit box slide rail, which was convenient for the empty fruit box to enter the fruit loading station of the working platform from the front and unloading from the rear after the fruit was filled. Six sub-conveyor belts were designed to handle apples harvested by six non interacting operators at the same time. The prototype was test in the field, and the packing uniform distribution coefficient calculation method was proposed to evaluate the uniformity of fruit packing, and the performance of the prototype was comprehensively evaluated in combination with the fruit damage rate and packing speed. The results showed that, the designed self-propelled orchard multi-station harvesting equipment could synchronize with the six stations manual harvesting speed. At the same time, with the help of the expansion platform, the apple picking range covered the entire canopy of the fruit tree. The prototype worked smoothly, and the speed of each conveyor belt was in good coordination with manual picking, and there was no apple congestion occurred. The apple harvest damage rate was 4.67%, the packing uniform distribution coefficient was 1.475, and the packing speed was 72.9 apples per minute, which could meet the requirements of orchard harvest operation.

Key words: crawler chassis; extended working platform; automatic conveyor packing; packing uniformity factor; harvest damage rate; transfer system

（登陆 www.smartag.net.cn 免费获取电子版全文）